

Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
С ВНУТРЕННЕЙ МАССОЙ, СОВЕРШАЮЩЕЙ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ***

Волгоградский государственный технический университет

denklopuk@gmail.com

Рассматривается метод управления роботом с внутренней массой, совершающей движение по окружности вокруг вертикальной оси робота. В процессе перемещения одна из опор находится в неподвижном контакте с поверхностью, в то время как другие – в фазе свободного перемещения относительно опорной поверхности. Это позволяет роботу проворачиваться вокруг неподвижной опоры.

Ключевые слова: робот, опора, заклинивание, управление движением, внутренняя масса.

D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov

**THE RESEARCH OF THE MOTION PRINCIPLES OF THE MOBILE ROBOT
WITH MOVING AROUND A CIRCLE INTERNAL MASS**

Volgograd State Technical University

The method of controlling a robot with an internal mass moving in a circle around the vertical axis of the robot is considered. During the movement, one of the supports is in stationary contact with the surface, while the others are in the phase of free movement relative to the support surface. This allows the robot to rotate around a fixed support.

Keywords: robot, support, jamming, motion control, internal mass.

© Бордюгов Д. В., Брискин Е. С., Шаронов Н. Г., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01589, <https://rscf.ru/project/22-29-01589/>

Введение

Известны мобильные роботы и транспортные средства с различными типами движителей: колесными [1, 2], гусеничными [1], шагающими [1, 3] и др. Роботы с шагающими движителями отличаются от других дискретным взаимодействием с опорной поверхностью, поэтому их можно рассматривать как механические системы, на которые накладываются связи (при взаимодействии движителей с опорной поверхностью), или же связи снимаются при переносе движителя в новое положение. Роботы, перемещающиеся за счет движения внутренних масс [4, 5, 6], также можно рассматривать как механические системы с голономными связями, но с управляемыми величинами реакций этих связей, зависящих от положения масс.

Наиболее показательное явление управления величинами реакций связей проявляется при исследовании движения роботов, перемещающихся за счет периодического заклинивания одного из движителей [7, 8]. Причем это заклинивание происходит или за счет изменения положения внутренней массы (рис. 1), или за счет изменения положения одного из движителей относительно опорной поверхности (рис. 2).

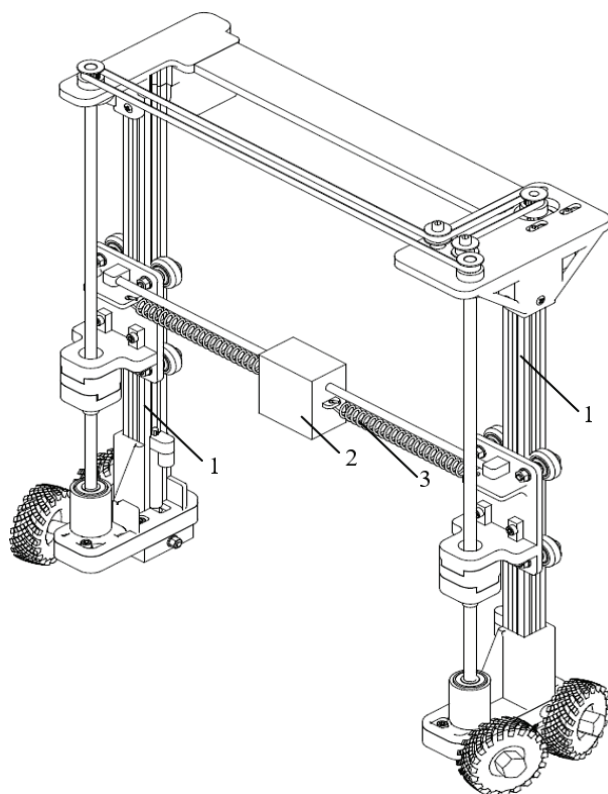


Рис. 1. Модель робота, перемещающегося за счет движения внутренней массы:
1 – опора; 2 – подвижная внутренняя масса; 3 – пружина

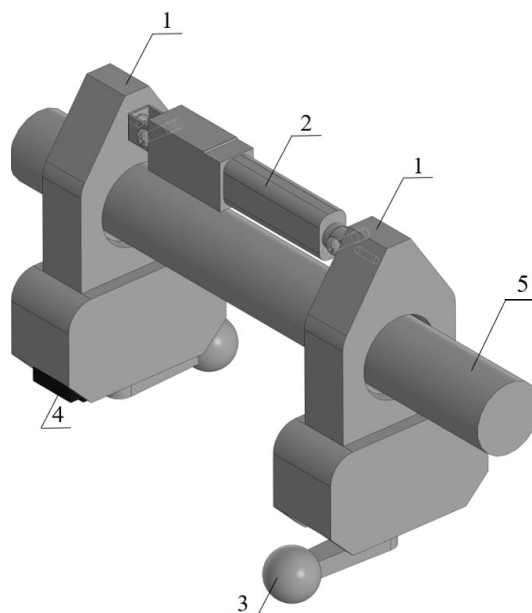


Рис. 2. Модель мобильного робота, движущегося по стержню:
1 – втулка; 2 – линейный привод; 3 – дополнительный груз; 4 – сервопривод; 5 – стержень

В первом случае траектория движения центра масс может быть различной, в зависимости от массово-геометрических параметров рассматриваемого робота; во втором – мобильный робот движется вдоль произвольно ориентированной в пространстве направляющей.

Развитие методов организации управляемого движения роботов возможно за счет объединения метода, основанного на движении внутренних масс и дискретного взаимодействия движителей с опорной поверхностью.

Кинематическая схема мобильного робота с вращающейся внутренней массой и описание его принципа движения

Рассматриваемый робот состоит из одного твердого тела, опирающегося на поверхность N

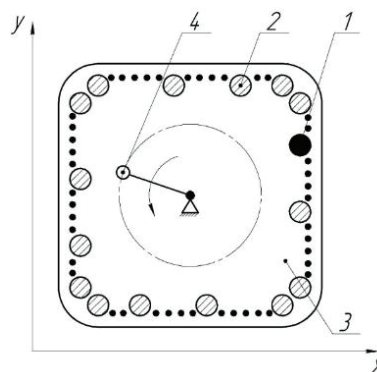


Рис. 3. Схема робота с внутренней массой, совершающей вращательное движение:
1 – заторможенная опора; 2 – свободная опора; 3 – корпус робота; 4 – неуравновешенное твердое тело, вращающееся вокруг вертикальной оси

опорами (например, шариковые опоры) и имеет внутреннее тело, совершающее вращательное движение вокруг вертикальной оси (рис. 3). В каждый момент времени одна из опор заторможена, что позволяет роботу совершать вращательное движение вокруг вертикальной оси, проходящий через нее.

Постановка задачи

Ставятся задачи: составление дифференциальных уравнений плоского движения робота с рассматриваемой кинематической схемой; определение уравнений движения рассматриваемого

робота при произвольном последовательном торможении одной из опор.

Математическое моделирование

Расчетная схема робота, перемещающегося за счет вращательного движения внутреннего тела, представлена на рис. 4.

Количество управляемых опор равно 4, установлены они симметрично.

Так как рассматривается установившийся режим движения внутренней массы, $\omega = \text{const}$, момент, развиваемый двигателем, минимален и не учитывается.

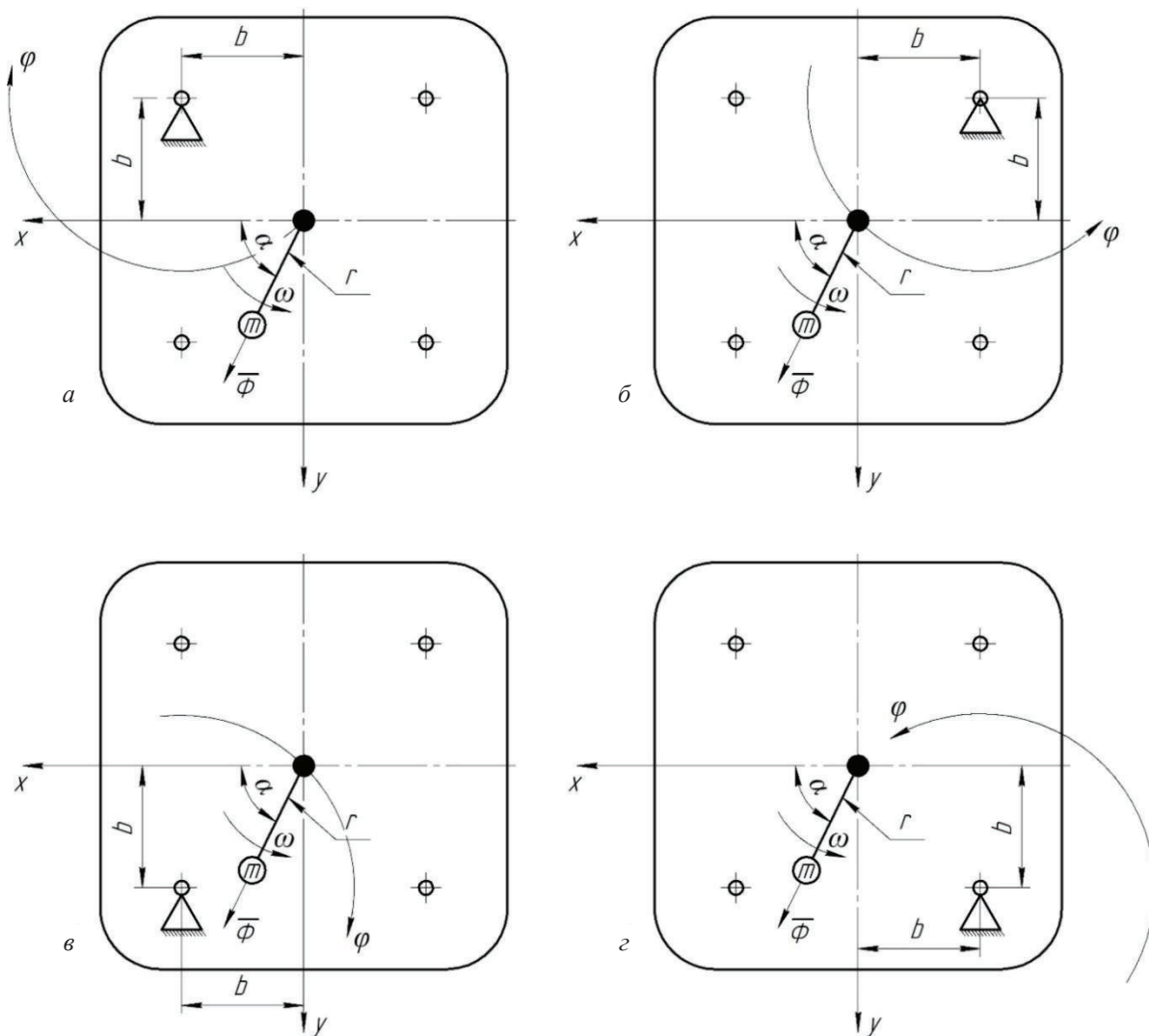


Рис. 4. Расчетная схема мобильного робота с внутренней массой, совершающей движение по окружности: а – первая опора неподвижна; б – вторая опора неподвижна; в – третья опора неподвижна; г – четвертая опора неподвижна

Обозначения на рис. 4: Φ – сила инерции; m – масса груза; r – длина стержня, на котором закреплен груз; b – расстояние от зафиксированной опоры до линии, проходящей через

центр робота; α – угол отклонения стержня относительно горизонтальной оси; ω – угловая скорость стержня с закрепленным на нем грузом; φ – угол поворота корпуса;

Уравнение движения корпуса робота, в предположении малости сил инерции, обусловленных

непосредственно вращательным движением робота относительно неподвижной опоры:

$$\begin{aligned} J_a \ddot{\phi} &= M_a, \\ J_a \ddot{\phi} &= \Phi_x b + \Phi_y b, \\ J_a \ddot{\phi} &= m r \omega^2 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega t) \cdot b + m r \omega^2 \cdot \sin(\alpha_0 + \omega t) \cdot b, \end{aligned} \quad (1)$$

где J_a – момент инерции корпуса робота; M_a – момент силы Φ , действующий со стороны вращающегося груза относительно неподвижной опоры; α_0 – начальный угол отклонения стержня относительно горизонтальной оси; $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение корпуса робота.

Имитационное моделирование

Для изучения характерных особенностей движения робота рассматривалась лабораторная модель с параметрами: $\alpha_0 = 1,0472$ рад; $\omega = 0,5$ рад/с; $b = 0,5$ м; $r = 0,3$ м; $J_a = 0,735$ кг·м³; $m = 2$ кг.

Начальные условия: $\phi = 0$ рад; $\dot{\phi} = 0$ рад/с.

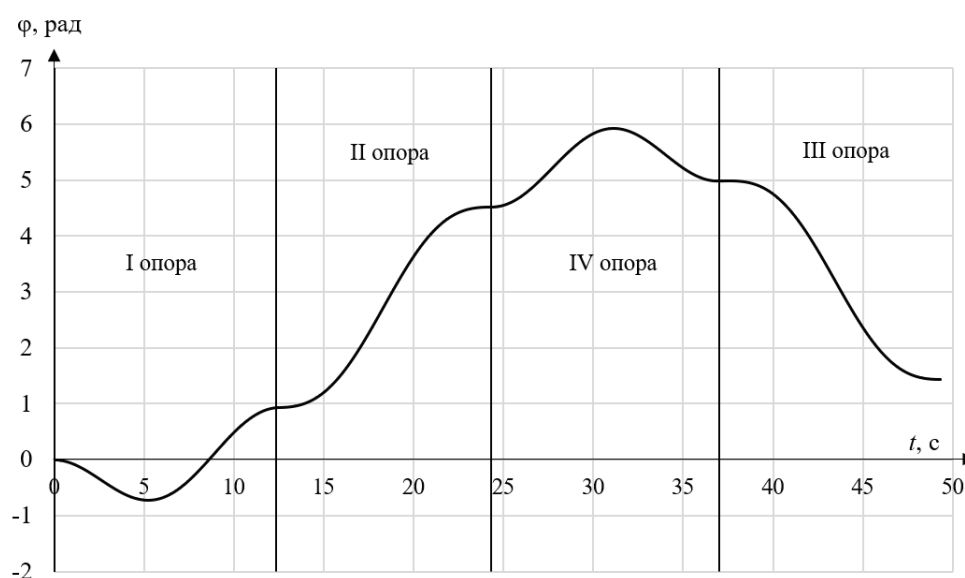


Рис. 5. Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота ϕ от времени t

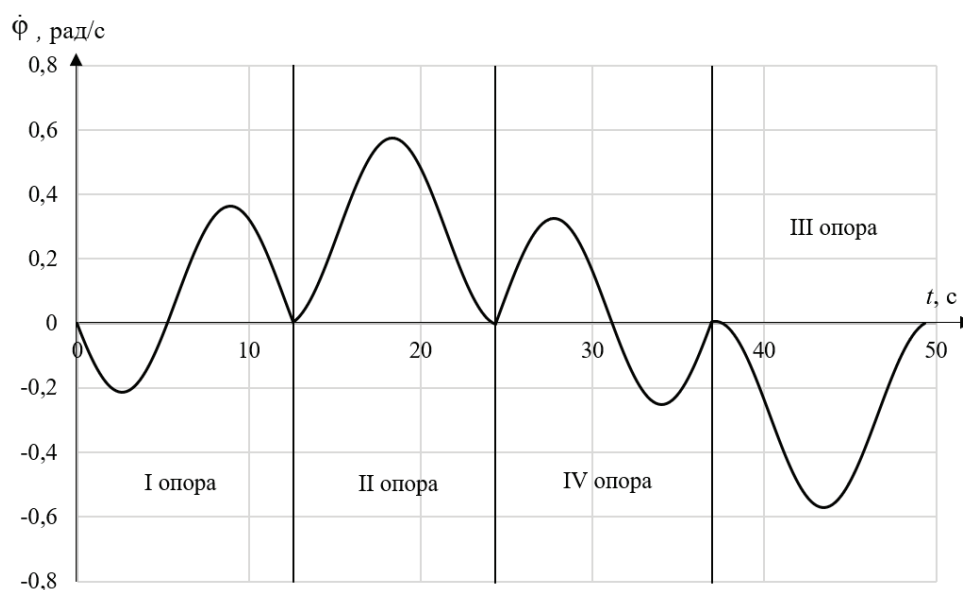


Рис. 6. Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\phi}$ от времени t

На рис. 5, 6 представлен следующий алгоритм движения мобильного робота с внутренним вра-

щающимся двигателем при условии смены опор в момент остановки корпуса робота ($\dot{\phi} = 0$):

Алгоритм управления движением мобильного робота

Промежуток времени движения t , с	Угол поворота внутренней массы α , град	Опора, взаимодействующая с поверхностью
$0 < t \leq 12,53$ с	$0 \dots 418,94$	I опора
$12,53 < t \leq 24,35$ с	$418,94 \dots 757,50$	II опора
$24,35 < t \leq 36,95$ с	$757,50 \dots 1118,54$	IV опора
$36,95 < t \leq 49,33$ с	$1118,54 \dots 757,50$	III опора

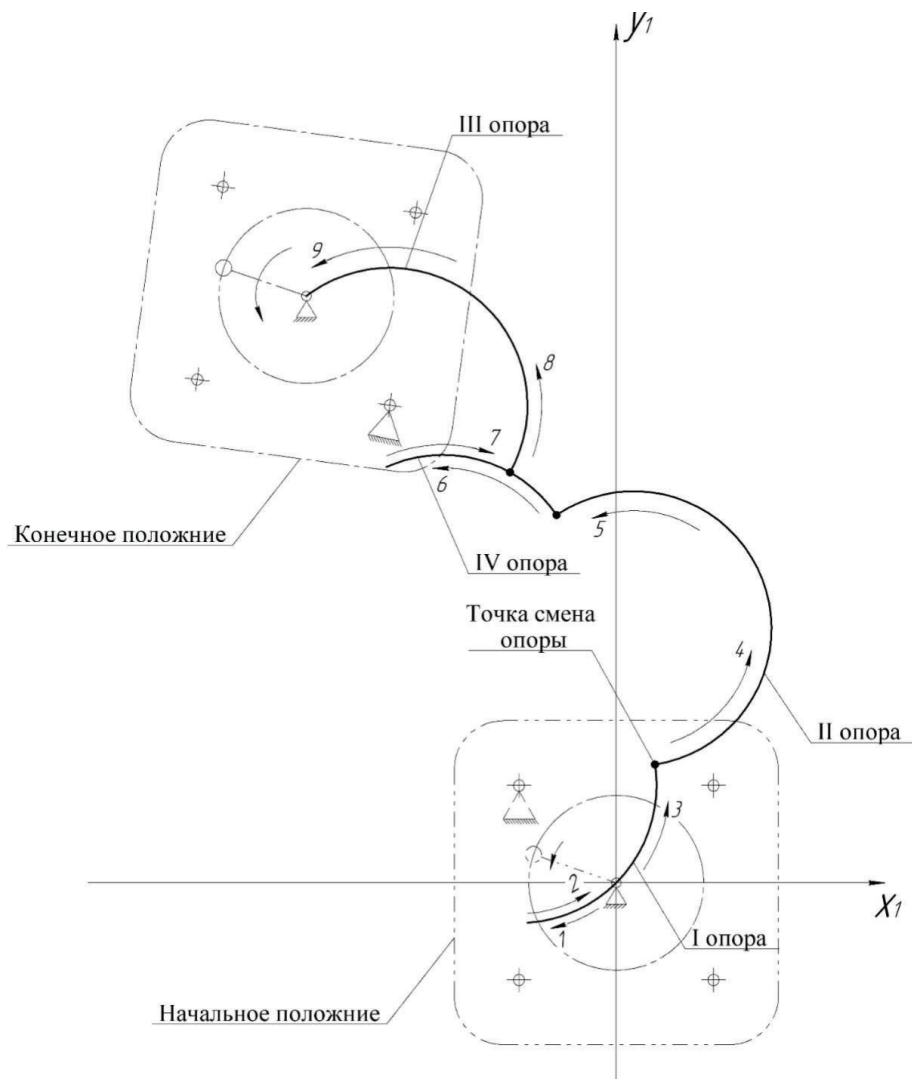


Рис. 7. Изменение положения центра корпуса мобильного робота

На рис. 7 представлена траектория изменения положения центра корпуса мобильного робота; подробнее рассмотрим участок движения 1–5. В начальный момент времени корпус начинает вращение по часовой стрелке 1, через определенное время происходит его торможе-

ние (рис. 6), после чего корпус начинает движение против часов стрелки 2, 3. В момент времени $t = 12,53$ с (см. таблицу выше) угловая скорость корпуса робота $\dot{\phi} = 0$, и происходит смена неподвижной опоры, вокруг которой совершается вращательное движение корпуса.

На отрезке 4–5 видно, что направление вращения не изменилось. Дальнейшее перемещение мобильного робота происходит аналогичным образом.

Заключение

Рассмотренный метод управления роботом с внутренней массой, совершающей движение по окружности вокруг неподвижной оси опоры робота с постоянной угловой скоростью и опорами робота, находящимися в заторможенном или свободном состоянии, позволяет осуществлять различное по виду и характеру движение робота.

Возможна постановка задачи о выборе такого алгоритма управления последовательного торможения опор, который обеспечивает наперед заданное перемещение мобильного робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 6–14.
2. Lozano-Perez, T. Autonomous robot vehicles / T. Lozano-Perez // Springer Science & Business Media, 2012. – 460 p.
3. The investigation of walking machines with movers on the basis of cycle mechanisms of walking / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, A. V. Maloletov, V. V. Zhoga // 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009, 09–12. – Changchun, 2009. – Pp. 363–366.
4. Черноусько, Ф. Л. О движении тела, содержащего подвижную внутреннюю массу / Ф. Л. Черноусько // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 405. – № 1. – С. 56–60.
5. Болотник, Н. Н. Оптимальное управление прямолинейным движением твердого тела по шероховатой плоскости посредством перемещения двух внутренних масс / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигуриа // Прикладная математика и механика. – 2008. – Т. 72. – № 2. – С. 216–229.
6. Черноусько, Ф. Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2006. – Т. 70. – № 6. – С. 819–842.
7. Бордюгов, Д. В. Об управлении движением мобильного робота с движителями, работающими на эффекте периодического заклинивания / Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 23–28.
8. Bordyugov, D. V. The research of a movement dynamics two-legged robot with spring-loaded weight / Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1129: International Conference of Young Scientists and Students «Topical Problems of Mechanical Engineering» (ToPME-2020). – 2021. – 7 p.